



TRABALHO FINAL MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA

Clínica Universitária de Otorrinolaringologia

Ecolocalização - Sonar Humano

Jorge Rebola

Maio 2019



TRABALHO FINAL MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA

Clínica Universitária de Otorrinolaringologia

Ecolocalização - Sonar Humano

Jorge Rebola

Orientado por:

Dr. Marco Simão

Maio 2019

Resumo

A ecolocalização e os dispositivos de substituição sensorial incluem-se nos métodos de reabilitação visual ao fornecer informações de cariz visual através de outras modalidades sensoriais intatas, com destaque para a audição.

A ecolocalização tem como base a interpretação das características psicoacústicas de ecos resultantes da reflexão de sons produzidos pelos indivíduos nas superfícies. Estas pistas permitem a indivíduos treinados e experientes identificar objetos a 4 metros de distância, distinguir objetos com 8° de ângulo acústico de diferença ou 1.58° de diferença na sua posição relativamente ao observador, o que é comparável à precisão ecolocalizadora de um morcego.

Já os dispositivos de substituição sensorial baseiam-se na descodificação de um algoritmo que transforma imagens visuais em sons com diferentes intensidades e frequências consoante a luminosidade e posição de cada *pixel* que compõe essa imagem. Estes aparelhos permitem ao utilizador não só identificar e localizar objetos, mas também discriminar texturas, letras ou expressões faciais, e até mesmo fornecer pistas relativas à profundidade e cor.

Tanto a ecolocalização como os dispositivos de substituição sensorial assentam na utilização de estruturas e percursos neuronais classicamente associados à visão. Além disso, permitem a construção de representações mentais do ambiente envolvente e a interação com ele, função classicamente da responsabilidade da visão. Por outras palavras, estes métodos permitem que indivíduos com deficiências visuais possam ver.

Apesar das evidências do seu potencial de utilização, há ainda um longo caminho a percorrer para que estes métodos de reabilitação visual possam ser aplicados mais amplamente e para tal é necessário uma articulação entre a sociedade e a comunidade científica.

Palavras-chave: Ecolocalização; Dispositivos de Substituição Sensorial

O Trabalho Final exprime a opinião do autor e não da FML.

Abstract

Echolocation and sensory substitution devices are included in visual rehabilitation methods as they provide visual information through other undamaged sensorial modalities as audition.

Echolocation is based on the interpretation of the psychoacoustic characteristics of the echoes originated in the reflection of sounds, produced by an individual, on the surfaces. These clues allow trained and experienced individuals to identify objects located at a 4 meters distance, distinguish between objects with a 8° acoustic angle difference in their acoustic size or even objects with a 1.58° difference between them on what concerns their position relative to the observer, which is comparable to the echolocating precision of a bat.

On the other side, the sensory substitution devices are based on the decodification of an algorithm that transforms visual images into sounds with different intensities and frequencies according to the luminosity and position of each pixel that makes the image. These devices allow the user not only to identify and locate objects, but also to discriminate between textures, letters or facial expressions, or even give clues concerning depth and colour.

Both echolocation and sensory substitution devices lay on the utilization of neuronal structures and circuits classically associated with vision. Besides, they allow the construction of mental representations of the environment as well as to interact with it, which is classically the responsibility of the visual system. In other words, these methods allow visual-handicapped individuals to see.

In spite of all the evidences for their potential use, there is still a long way ahead so that these methods can be taken as a serious visual rehabilitation weapon and in order to do so it is crucial to have a strong articulation between society and the scientific community.

Keywords: Echolocation, Sensory Substitution Devices

The Final Work expresses the opinion of the author and not of FML.

Índice

INTRODUÇÃO	7
ECOLOCALIZAÇÃO HUMANA.....	9
SOM.....	9
INFORMAÇÃO OBTIDA	12
ECOLOCALIZAÇÃO A NÍVEL NEURONAL	15
ECOLOCALIZAÇÃO E CEGUEIRA.....	17
DISPOSITIVOS DE SUBSTITUIÇÃO SENSORIAL.....	19
PANORAMA ATUAL	20
MODO DE FUNCIONAMENTO	21
A BASE NEURONAL	22
ATENÇÃO E TREINO	23
INFORMAÇÃO OBTIDA.....	24
A POSSIBILIDADE DE VER.....	26
CONCLUSÕES.....	29
AGRADECIMENTOS	31
BIBLIOGRAFIA	33

Introdução

Atualmente, cerca de 217 milhões de pessoas vivem com algum tipo de dificuldade visual grave e dessas cerca de 36 milhões são consideradas cegas ⁽¹⁾, o que faz da deficiência visual um problema de âmbito mundial. Nos últimos anos, têm-se dado largos passos nas áreas da prevenção e cuidados de saúde, bem como na área da reabilitação. Alguns avanços como as próteses de retina artificiais e o transplante de fotoreceptores mostraram-se muito promissores, mas acabaram por enfrentar alguma desilusão por parte da comunidade científica face aos resultados aquém do esperado, as elevadas dificuldades técnicas e ainda o elevado custo. ^(2,3)

Esta incidência de técnicas de reabilitação no sistema visual periférico faz sentido se considerarmos que 95% dos casos de cegueira têm por base anatômica o olho, retina ou percurso visual neuronal, poupando o córtex occipital. ⁽³⁾ Ora, é neste contexto que surge uma abordagem diferente, baseada no racional de que se o córtex se encontra perfeitamente funcional então talvez seja possível fornecer-lhe informação “visual” através de um outro sentido cuja componente periférica esteja intacta. E é precisamente sobre isto de que falará este trabalho, debruçando-se sobre duas formas diferentes mas relacionadas de fazer uso desse racional: a ecolocalização humana e os dispositivos de substituição sensorial.

Ecolocalização humana

Desde a antiguidade greco-romana que pensadores e filósofos se debruçam sobre a forma como a experiência sensorial se reflete em representações mentais. Durante o Iluminismo do século XVIII, este interesse filosófico, centrado sobretudo nos deficientes invisuais, ganhou contornos mais empíricos. Em 1749, Diderot descreve em *Letter of the blind for those who see* o caso de um homem invisual capaz de localizar objetos e estimar a distância a que se encontravam. ⁽⁴⁾ Daí em diante diversas explicações para tal foram surgindo com destaque para a criação do conceito *visão facial*, baseado na ideia de que seriam mudanças na pressão da massa de ar sobre a cara que permitiriam esta capacidade. Foi necessário esperar quase dois séculos para que este mistério fosse desvendado. Na década de 40 e 50 do século XX, através duma série de estudos experimentais levados a cabo na Universidade de Cornell, foi demonstrado que esta capacidade era, na verdade, devido à audição de ecos produzidos pelos passos e outros sons reflectidos nos objetos identificados. ⁽⁵⁻⁷⁾ O termo *visão facial* foi então substituído pelo termo *ecolocalização*, termo esse criado na mesma década por um investigador que estudava o modo como os morcegos se orientam no escuro. ⁽⁸⁾

Assim sendo, conseguimos compreender que o tema da ecolocalização, embora altamente desconhecido não só entre leigos mas também no mundo académico, não é algo recente. Contudo, com comprovada aplicabilidade e benefícios para aqueles cuja capacidade visual é nula ou muito reduzida, serve o presente trabalho para mostrar o que hoje se sabe sobre ecolocalização.

Som

Neste complexo processo que é a ecolocalização, o primeiro passo é a produção do som, o qual pode ser obtido batendo as palmas das mãos, estalando os dedos, utilizando o bastão de mobilidade ou oralmente. De entre estes, os sons produzidos no palato, pelo vácuo, ao movimentar rapidamente a língua em direção descendente parecem ser os mais eficientes. ⁽⁹⁻¹¹⁾ Apesar da variação individual das características destes sons, parece haver alguma consistência ao nível de duas

características: duração – 3ms – assim como na frequência máxima – 2-4 kHz. ^(12,13) Ainda assim, tal não significa que estes sejam os valores perfeitos para a ecolocalização humana, uma vez que estes valores resultam apenas de estudos observacionais.

Por outro lado, apesar de alguns estudos mostrarem maior precisão na identificação de objetos com sons de maior duração ⁽¹⁴⁻¹⁶⁾, outros autores colocam a hipótese de uma maior precisão nesta tarefa com uma menor duração dos sons produzidos. ⁽¹³⁾ De salientar que os primeiros utilizaram indivíduos sem perda de função visual vendados. Embora aparentemente incompatíveis, uma conciliação entre ambas as perspectivas parece plausível se considerarmos a menor sensibilidade acústica e de decodificação dos ecos dos indivíduos normovisuais comparativamente com os indivíduos invisuais, que necessitam de menor duração do som para extrair pistas acústicas que lhes permitam localizar os objetos. ⁽¹⁵⁾ Além disso, esta curta duração poderá oferecer vantagens em termos de reprodutibilidade, imunidade ao ruído e até mesmo resolução espacial. ⁽¹³⁾ Estas diferenças de resultados serão abordados mais adiante, com maior detalhe.

Uma conclusão que parece ser unânime é a de que a resolução espacial aumenta proporcionalmente ao aumento do conteúdo sonoro com elevada frequência, ou seja, sons mais agudos. ^(7,13,14,16,17)

Chegamos ao segundo passo da ecolocalização, a forma como é feita a decodificação dos ecos ouvidos, isto é, que pistas acústicas permitem localizar os objetos. De uma forma global podemos referir dois grandes grupos de pistas acústicas – o volume ou sonância (*loudness*) e a altura sonora (*pitch*). ^(7,15,17) Estas duas grandezas incluem-se na psicoacústica e como tal são subjetivas, perceptuais e, sobretudo, de difícil definição. De uma forma simplificada, o volume pode ser definido como o efeito da energia contida na onda sonora no ouvido humano, de tal maneira que podemos ordenar sons do mais fraco para o mais forte (embora na língua portuguesa, frequentemente, nos refiramos a tal como “baixo” e “alto”). A altura é a sensação auditiva transmitida pela frequência de vibração da fonte sonora, de tal maneira que nos permite ordenar os sons do mais baixo para o mais alto. ⁽¹⁸⁾

Ora, para distâncias curtas, o eco produzido sobrepõe-se ao som emitido, de modo que o volume percebido aumenta. Por sua vez, este aumento pode ser geral, ao longo de todo o espectro da onda sonora emitida (*overall-loudness*), centrar-se numa banda específica de frequências (*inside-channel-loudness*) ou mesmo

apresentar diferenças entre diferentes bandas de frequência (*across-channel-loudness*).⁽¹⁶⁾ Por outro lado, a sobreposição entre os dois sons cria uma alteração no próprio espectro do som, uma “coloração” do som, a que a literatura chama *repetition pitch*.

Esta última pista mostrou ser fundamental para distâncias curtas como demonstrado por Arias e Ramos, confirmando estudos anteriores.^(7,19) Mais recentemente, Schenkman e Nilsson corroboraram esta hipótese ao mostrar que, para distâncias inferiores a 2 metros, as pistas relativas às alterações no espectro do som e as pistas temporais (abordadas adiante) tinham uma maior preponderância face às pistas de alteração do volume.⁽¹⁵⁾ Contudo, qual é o limiar de distância para a utilização de cada uma das pistas anteriores?

Esta pergunta carece de maior investigação, embora Rowan *et al.* tenham mostrado que para distância maiores (4m), a pista *across-channel-loudness* e *inside-channel-loudness* para frequência mais altas é fundamental na detecção de objetos.⁽¹⁶⁾ Esta descoberta vem suportar a evidência, já anteriormente referida, da importância do espectro de alta frequência na ecolocalização. No entanto, mostra também que apesar das baixas frequências não conterem exclusivamente em si informação útil para a ecolocalização, servem de referência para a utilização da pista *across-channel-loudness*. Apesar de neste estudo terem sido utilizados sons com duração superior àqueles utilizados no dia-a-dia por ecolocalizadores (500ms vs 3ms), estas evidências poderão ser extrapoladas também para sons de menor duração utilizados em curtas distâncias. Além disso, mesmo em distâncias mais longas com emissões curtas, devido à transmissão óssea do som, algumas frequências mais baixas proporcionam uma sensação auditiva mais prolongada, permitindo a sobreposição do som emitido com o eco, de modo que o indivíduo consegue ter acesso às pistas acústicas acima referidas.⁽²⁰⁾

A estas pistas já referidas acrescentamos ainda as suas diferenças a nível interaural, ou seja, não só a nível de percepção em si, mas também a nível de tempo de percepção destes dois conceitos em cada um dos ouvidos, isto porque um objeto localizado a uma distância maior terá um tempo maior de atraso para o eco correspondente assim como um objeto localizado mais para a direita terá um eco correspondente mais intenso detetado pelo ouvido direito do que aquele detetado pelo ouvido esquerdo.^(14,21)

Apesar de todas estas evidências, nem todas são unânimes e serão necessários mais estudos de modo a compreender, de facto, quais as pistas acústicas que possibilitam a ecolocalização de objetos, sobretudo no quotidiano e em condições reais.

Informação Obtida

À semelhança do que acontece com outros animais especializados em ecolocalização, os casos do golfinho e morcego, também no homem, a ecolocalização tem um objectivo muito concreto: permitir a orientação e navegação no espaço. Para tal, é necessário um elevado número de informação espacial, cuja discriminação não se afigura fácil, apesar do quão intuitiva esta tarefa é para os normovisuais.

Ainda antes de começarmos a analisar cada uma destas pistas espaciais, é importante salientar duas perspectivas diferentes na utilização dessas mesmas pistas, nomeadamente a distinção entre detecção de um objeto e distinção entre objetos. De seguida abordaremos cada uma destas duas perspectivas para cada uma das pistas espaciais, sempre que possível.

Após uma breve reflexão, a maioria chegaria à conclusão de que a informação mais básica e que serve de base a muitas outras, como veremos, é a distância. Shenkman e Nilson mostraram que, para distâncias maiores que 2 metros, a maioria dos indivíduos, invisuais e normovisuais, obtinham taxas de sucesso na identificação de objetos próximas do acaso.⁽¹⁵⁾ Contudo, 2 indivíduos mostraram conseguir identificar objetos consistentemente a uma distância de 4 metros. Esta acuidade da ecolocalização para distâncias mais longas foi também observada por Rowan *et al.*, mesmo para indivíduos normovisuais sem treino em ecolocalização.⁽¹⁶⁾

Por outro lado, normovisuais mostraram conseguir distinguir objetos separados por 40cm quando estes se encontram a 170cm, 80cm quando se encontram a 340cm e 125cm quando se encontram a 680cm.⁽²⁰⁾ Tendo em conta a maior capacidade ecolocalizadora de invisuais (tópico abordado de seguida), podemos projetar, com alguma confiança, uma maior discriminação destes intervalos de distâncias nestes indivíduos. De qualquer maneira, parece ser constante a conclusão de que o poder de ecolocalização está inversamente relacionado com a distância para

o mesmo objeto.

Isto leva-nos a um segundo conceito, nomeadamente o tamanho acústico ou ângulo acústico. Este difere do tamanho real e relaciona-se inversamente com a distância na medida em que o mesmo objeto, com o mesmo tamanho real, tem um ângulo acústico cada vez menor à medida que a distância aumenta. Este conceito é transversal ao ângulo visual, conceito que experimentamos todos os dias – os objetos parecem-nos cada vez mais pequenos à medida que a distância a eles aumenta. Teng e Whitney mostraram que ecolocalizadores normovisuais conseguem detetar diferenças no ângulo acústico na ordem dos 17 graus para objetos localizados a 33cm e 19 graus quando estes se encontram a 50cm. ⁽²²⁾ Ora esta diferença medida pelo teste de Monte Carlo não é estatisticamente significativa pelo que podemos concluir que o limiar de discriminação de tamanho não é limitado pela distância ou pelo tamanho real dos objetos mas pela diferença do ângulo acústico entre eles. Por outro lado, no mesmo estudo, um indivíduo cego perito em ecolocalização conseguiu detetar diferenças de ângulo acústico tão pequenas quanto 8 graus para uma distância de 75cm. Estes dados vão de encontro a outros mais antigos como é o caso de Rice e Feinstein que mostraram a capacidade de um indivíduo discriminar objetos com uma relação de áreas de 1.07:1. ⁽²³⁾ Não é claro se esta acuidade de discriminação se mantém para distâncias superiores, pelo que mais estudos e investigações devem ser realizados nesse sentido.

A importância relativa do ângulo acústico não invalida, contudo, a presença de “constância de tamanho” durante a ecolocalização. De facto, os peritos em ecolocalização parecem conseguir distinguir objetos não só através do seu tamanho acústico mas também através do seu tamanho real. ⁽²⁴⁾ Seria de pensar que quanto maior for o tamanho real dos objetos maior seria a acuidade na sua detecção. ⁽²³⁾ Contudo, tal parece ser verdade até certo ponto, uma vez que a partir de determinado tamanho as reflexões especulares do som (reflexões tipo espelho) não aumentam e a difração do mesmo nos limites do objeto não é perceptível pelo indivíduo uma vez que esses limites se encontram distantes do sujeito.

Com a distância e o tamanho, bem como a sua estreita relação, falta uma outra pista ao ecolocalizador de maneira a localizar espacialmente e com precisão objetos – a posição relativa. Thaler *et al.* mostraram que um indivíduo cego por um longo período (“early-blind”), que aprendeu a ecolocalizar bastante cedo, conseguia detetar alterações na posição lateral de um poste (diâmetro 6cm, altura 180cm e colocado a

uma distância de 150cm) de cerca de 4 graus. ⁽¹²⁾ Já um outro indivíduo invisual há menos tempo (“late-blind”), com menos anos de prática em ecolocalizar, apresentava um limiar de discernimento em volta dos 9 graus (esta diferença será alvo de discussão mais tarde). Teng e Whitney, usando um paradigma de Vernier, mostraram que dois indivíduos normovisuais, sem treino prévio em ecolocalização, conseguiam detetar diferenças na posição lateral entre dois discos (20cm de diâmetro e posicionados a 50cm de distância) de 4,1 graus e 6,7 graus. ⁽²²⁾ Já um ecolocalizador perito invisual conseguiu detetar diferenças no mesmo modelo (os discos encontravam-se contudo a 75cm) de cerca 1,58 graus. Os mesmos autores, num outro estudo ⁽²⁵⁾, e utilizando o mesmo modelo, mostraram que 6 indivíduos invisuais, peritos em ecolocalização (pelo menos 20.000 horas de utilização), apresentavam um limiar médio de discernimento de posição entre os dois discos (para os 3 melhores ecolocalizadores os discos encontravam-se a 100cm e para os restantes 3 a 50cm), de 3,46 graus, com os 3 melhores ecolocalizadores a obterem menos de 2 graus. Esta acuidade ecolocalizadora é comparável à acuidade visual para uma excentricidade de 35 graus, que foi cerca de 1,4 graus como medida pelos referidos autores. Mais impressionante ainda é a comparação entre esses mesmos valores e o limiar de acuidade ecolocalizadora obtido para o morcego, animal com milhões de anos de evolução para a sua especialização em ecolocalização – 1,5 graus. ^(26–28)

As pistas acústicas que permitem ao ecolocalizador obter estas informações espaciais foram já acima descritas. Embora haja algumas teorias relativamente à especificidade com que cada pista é utilizada para cada uma das tarefas espaciais anteriormente mencionadas, essa mesma especificidade não é suficientemente satisfatória pelo que nenhum modelo é aceite globalmente. Tal deve-se a que, além das pistas espaciais, os ecolocalizadores têm de lidar ainda com pistas da superfície do objeto nomeadamente, o material de que este é feito, bem como a forma do mesmo. Alguns estudos mostram ser possível distinguir entre objetos feitos de diferentes materiais e com diferentes formas, embora faltem evidências que mostrem a possibilidade de identificar o material do objeto isoladamente, sem termo de comparação com outros objetos. ^(29,30)

Chegados a este ponto, e discutidas as pistas/informações que permitem ao ser humano recorrer à ecolocalização, podemos seguir o modelo proposto por Teng e Whitney, organizando-as em 5 níveis. Num primeiro nível, teríamos as propriedades físicas do som, nomeadamente a frequência e intensidade. Num segundo nível, as

diferenças temporais e de intensidade do som interaurais, bem como as alterações do espectro provocadas pelo som reflectido. Num terceiro nível, a resolução espacial com pistas como o tamanho, distância e posição. Num quarto nível, a representação da superfície através da forma e textura. E finalmente, num quinto nível, como resultado da integração de toda a informação acima mencionada, a percepção do objeto e consequente navegação, o objetivo derradeiro da ecolocalização.⁽²²⁾

Para concluir, e apesar da simplicidade deste modelo, é necessário referir uma vez mais a complexidade envolvida no processo de descodificação do som percebido, de tal modo que se exigem investigações posteriores de forma a compreender a verdadeira psicoacústica envolvida na ecolocalização.

Ecolocalização a nível neuronal

Os circuitos e recursos neuronais utilizados durante a ecolocalização só recentemente começaram a ser estudados e compreendidos, com descobertas reveladoras relativamente à plasticidade neuronal e recrutamento de áreas à partida dedicadas a outras funções. De Volder *et al.* mostraram atividade cerebral nas áreas de Brodmann 17, 18 e 19, ou seja, no córtex visual primário, secundário e associativo, respetivamente, durante movimentos de orientação auditiva simples utilizando dispositivos de substituição sensorial (DSSs).⁽³¹⁾ Contudo, o processo de ecolocalização natural, com sons produzidos pelo próprio, difere daquele com a utilização de DSSs, pelo que as estruturas utilizadas poderão não ser exatamente as mesmas. Mais recentemente, Collignon *et al.* propuseram também o recrutamento de áreas visuais para o processamento espacial de sons em indivíduos invisuais, embora não o tenham demonstrado em ecolocalização ativa.⁽³²⁾

Seguindo esta perspetiva, Thaler *et al.* realizaram um estudo, utilizando gravações de sons produzidos juntamente com os respetivos ecos, reproduzindo assim uma tarefa de ecolocalização ativa.⁽¹²⁾ Foram comparados dois indivíduos invisuais peritos em ecolocalização com dois indivíduos normovisuais sem experiência ecolocalizadora. Mostrou-se que a atividade no córtex calcarino nos dois sujeitos invisuais aumentava na presença de ecos num conjunto de sons complexos comparativamente aos mesmos sons na ausência dos ecos. Tal não sucedia com os

sujeitos normovisuais. Por outro lado, não havia qualquer diferença de atividade no córtex auditivo entre ambas as situações para nenhum dos indivíduos testados. Além disso, constatou-se que o aumento de atividade no córtex calcarino era maior no sujeito invisual com maior tempo de cegueira, o que será analisado no capítulo seguinte. Foi também observada uma preferência de ativação contralateral, tal como sucede para informação visual nos indivíduos normovisuais, tendo sido descartada uma relação causal com diferenças de atenção espacial.^(12,33) Estas conclusões tinham sido propostas já anteriormente em outros estudos como Pascual-Leone e Hamilton, Burton, Noppeney e foram suportados posteriormente por outros estudos como Wallmeier *et al.*⁽³⁴⁻³⁷⁾

Estas evidências levam-nos a extrapolar que as estruturas que processam informação visual em indivíduos normovisuais serão recrutadas para processamento de informação auditiva ecolocalizadora em indivíduos invisuais peritos em ecolocalização.

Esta plasticidade neuronal é ainda maior tendo em conta que os indivíduos peritos em ecolocalização mostraram também:

- atividade no lobo temporo-occipital, coincidindo com a área MT+, tradicionalmente associado ao movimento em normovisuais, quando estimulados com sons que induziam movimento do objeto refletor.⁽¹²⁾
- atividade no complexo occipital lateral, associado ao processamento das formas em normovisuais, quando estimulados com ecos refletidos por objetos com diferentes formas.⁽³³⁾
- atividade no córtex parahipocampal esquerdo, associado ao processamento visual e auditivo das propriedades dos materiais em normovisuais, quando estimulados com ecos refletidos por superfícies revestidas por diferentes materiais.^(24,38-40)

São de facto inúmeras as semelhanças entre a ecolocalização e a visão tradicional não só nos recursos neuronais utilizados mas também na sua função – a de calibrar as relações espaciais do espaço que nos rodeia criando uma representação mental do mesmo – algo fundamental na relação que estabelecemos com o meio em que estamos, mas frequentemente deficitário em invisuais.⁽⁴¹⁾

Todas estas descobertas, embora ainda não totalmente esclarecedoras, iluminaram já alguma parte da vasta complexidade dos circuitos neuronais utilizados

em ecolocalização, e acima de tudo da plasticidade e organização intermodal do cérebro humano, evidente em indivíduos com perda de um dos sentidos com especial destaque para a surdez e a cegueira. ⁽⁴²⁻⁴⁵⁾

Ecolocalização e Cegueira

Mesmo sem ecolocalizar ativamente os indivíduos invisuais apresentam uma maior sensibilidade para ecos do que indivíduos normovisuais, permitindo-lhes, por exemplo, distinguir com maior precisão dois sons em rápida sucessão. ^(46,47) Tal está intimamente relacionado não só com a sua maior acuidade auditiva mas sobretudo pela maior capacidade em discernir pistas acústicas pertinentes. ^(32,48,49)

Mesmo entre indivíduos invisuais existe uma enorme variação individual. De facto, Thaler *et al.* ao compararem um indivíduo invisual com perda de função visual muito precocemente na sua vida (13 meses) com um outro que perdeu a capacidade visual tardiamente (14 anos), mostraram uma considerável diminuição da acuidade ecolocalizadora do primeiro para o segundo num espaço anecoico, onde as pistas acústicas são muito reduzidas. ⁽¹²⁾ Nesse mesmo trabalho, mostrou-se também uma maior ativação do córtex calcarino no primeiro relativamente ao segundo. Esta correlação entre a idade de perda de função visual e acuidade ecolocalizadora seria confirmada por Teng *et al.*, utilizando 6 indivíduos invisuais peritos em ecolocalização, embora não tenha sido mostrada uma correlação estatisticamente significativa entre a acuidade e a duração da cegueira ou tempo de treino estimado. Tal pode ser explicado por estas variáveis serem covariáveis e atuarem sinergicamente a nível estatístico. ⁽²⁵⁾

Assim, e embora sejam necessárias experiências com uma amostra maior de forma a consolidar estas conclusões, podemos afirmar que os indivíduos invisuais são melhores ecolocalizadores que os normovisuais, o que pode ser explicado não só pela maior acuidade auditiva dos primeiros mas também pelo fato da ecolocalização e função visual poderem competir pelos mesmos recursos neuronais, como vimos anteriormente. Dentro dos indivíduos invisuais peritos em ecolocalização, a idade de perda de função visual relaciona-se inversamente com a capacidade ecolocalizadora uma vez que indivíduos cegos há mais tempo tiveram um maior período de utilização

da ecolocalização, bem como um maior período para recrutamento cortical das áreas cerebrais referidas já anteriormente. ^(12,50)

Perante estas diferenças podemos questionar-nos se o treino da ecolocalização aumenta a proficiência na mesma. ⁽⁵⁰⁾ Teng e Whitney mostraram que alguns indivíduos normovisuais sem qualquer experiência ecolocalizadora, após um período de treino, se aproximaram da acuidade ecolocalizador de sujeitos invisuais com algumas décadas de experiência, testados em estudos anteriores. ^(22,23,51)

Por outro lado, não é também claro que todos os indivíduos invisuais consigam atingir o mesmo nível de proficiência ecolocalizadora. Tal coloca-nos na equação uma outra variável individual própria de cada indivíduo para o seu potencial de evolução nas tarefas ecolocalizadoras. ^(14,22,25) Uma outra prova desta variabilidade individual, observada no estudo de Teng e Whitney é a dispersão dos valores percentuais de desempenho dos indivíduos normovisuais, entre 45,6% e 95%, utilizando o paradigma de Vernier. ⁽²²⁾

Tendo em conta esta variabilidade individual, poderíamos considerar a capacidade auditiva como uma variável favorável, como aliás foi já evidente através da comparação entre indivíduos normovisuais e invisuais. Contudo, tal não parece ser uma variável determinante dentro de cada um dos grupos, uma vez que Thaler *et al.* mostraram não haver alterações a nível da ativação do córtex auditivo entre os indivíduos testados, tanto normovisuais como invisuais. ⁽¹²⁾ Por outro lado Carlson-Smith e Weiner não mostraram qualquer correlação estatisticamente significativa entre elevada sensibilidade para tons de elevada frequência e capacidade ecolocalizadora. ⁽⁵²⁾ Tal implicaria que a perda auditiva, a qual é maior para frequência maiores não influenciaria a capacidade ecolocalizadora. ⁽⁵³⁾

Torna-se evidente que serão necessários ainda mais investigações e estudos de modo a perceber que atributos fazem de um individuo um bom ecolocalizador e, sobretudo, como otimizar as capacidades ecolocalizadoras dos indivíduos invisuais através da utilização do treino sistemático.

Dispositivos de substituição sensorial

Para falarmos de dispositivos de substituição sensorial (DSSs), devemos primeiro definir no que consistem estes aparelhos. Auvray *et al.* colocam-nos lado a lado com a calculadora, caneta e outros objetos quotidianos classificados como ferramentas de complemento para a mente, ou, se preferirmos uma tradução mais literal, ferramentas que melhoram a mente (*mind-enhacing tools*).⁽⁵⁴⁾ Os DSSs não são mais do que uma interface entre o homem e a máquina, permitindo, no caso dos invisuais, transformar informação que, à partida, seria visual em informação auditiva ou tátil, utilizando para tal um algoritmo predefinido. Desta forma, permitem uma transformação da experiência de percepção uma vez que informação apreendida por um receptor artificial é processada por um órgão sensorial diferente do que aquele que normalmente seria utilizado para o fazer.⁽⁵⁵⁾ Para tal, os DSSs são compostos por 3 módulos principais: os receptores sensoriais que captam a informação visual a ser transformada, a unidade de processamento responsável por extrair a informação, codificá-la e enviar para o terceiro módulo, o emissor, que apresenta a informação ao utilizador.⁽³⁾

Apesar de poder parecer um conceito futurístico, retirado duma obra de ficção científica, este é já um conceito relativamente antigo, sendo que o primeiro DSS utilizado é a escrita em *Braille*, uma técnica inicialmente desenvolvida para permitir aos soldados franceses lerem mensagens no escuro, na era Napoleónica, e que viria a tornar-se, anos mais tarde, numa ferramenta fundamental e facilitadora na vida dos invisuais.⁽³⁾ A própria cana utilizada por muitos cegos funciona como DSS, possibilitando recriar imagens visuais não só através do tato da cana, que funciona como um prolongamento da mão, como também através dos sons e ecos produzidos pela mesma.

Partindo do que foi dito já anteriormente, os DSSs podem dividir-se em duas grandes categorias: os visual-tácteis e os visual-auditivos, dependendo da modalidade final em que a informação é veiculada. Apesar da primeira categoria apresentar maior número de estudos, é sobre a segunda categoria de DSSs que me irei debruçar neste trabalho. Além do mais, a utilização do sistema auditivo como receptor último da informação apresenta uma série de vantagens pois esse sistema consegue lidar com informação complexa e rapidamente mutável, mesmo em ambientes ruidosos, além de

apresentar limiares de discriminação de intensidade e frequência apurados. ^(55,56)

Os DSSs visual-auditivos apresentam atualmente uma resolução de 4500 *pixels*, muito superior àquela dos visual-tácteis. ⁽⁵⁷⁾ Finalmente, necessitam apenas de um pequeno aparelho codificador e uns auriculares, o que, juntamente com a baixa energia necessária à produção de estímulos auditivos, torna estes dispositivos relativamente económicos. Striem-Amit *et al.* mostram-nos que o preço de todo o conjunto se situa nos 200\$, podendo ficar bem abaixo caso o aparelho codificador seja substituído por um *smartphone* corrente. Esta acessibilidade é fundamental uma vez que 90% dos invisuais vive em países em desenvolvimento. ⁽⁵⁷⁾

Panorama atual

Feita a introdução, podemos agora debruçar-nos mais aprofundadamente nos DSSs visual-auditivos, cujo primeiro modelo data ao final do século XIX, com algo chamado *Elektroftalm*. ⁽³⁾ Sendo comum a modalidade final da informação, como já foi referido, pode, no entanto, diferir a modalidade com que é captada essa informação. Esta pode ser feita utilizando os conceitos abordados na primeira parte deste trabalho – a ecolocalização – utilizando, no entanto, ultrassons de modo a poder ter informação mais detalhada que é depois codificada em sons na faixa audível para o ser humano, ou através da utilização de uma câmara, codificando a informação também na faixa audível para o ser humano. ⁽³¹⁾ Esta última é a modalidade mais utilizada atualmente e sobre a qual existe maior número de estudos.

Contudo, uma vez mais, também este não é um conceito novo sendo que os principais dispositivos existentes atualmente datam a sua criação há pelo menos 20 anos – *the vOICe* em 1992, *PSVA* em 1998 e *Cronly-Dylon* em 1999. ⁽⁵⁵⁾ Ainda assim, apesar de décadas de investigação e melhoria dos dispositivos, estes demoram a impor-se como uma arma viável e valiosa na reabilitação dos invisuais, permanecendo sobretudo como uma ferramenta de investigação. Alguns autores defendem que tal se deve a algum constrangimento na praticabilidade da utilização no dia-a-dia ou à falta do carácter intuitivo da utilização, necessitando de longos períodos de treino com resultados insatisfatórios e imprevisíveis. ^(58,59) Contudo, nenhum destes argumentos é totalmente válido como veremos em seguida. Não obstante, o principal

obstáculo é, sem dúvida, a falta de envolvimento social e institucional na aprendizagem de utilização destes dispositivos, bem como a falta de planos de treino específicos e integrados. ⁽³⁾ Além disso, os DSSs enfrentam um outro entrave, sobretudo quando utilizados por invisuais congénitos ou que desde muito cedo perderam a visão – a perda dos “períodos críticos”. Este conceito será abordado mais adiante.

Assim, poderão os DSSs voltar a afirmar-se como algo mais do que uma curiosidade de investigação ou um meio de investigação para os processos neuronais de plasticidade?

Modo de funcionamento

Os DSSs visual-auditivos capturam os *frames* visuais e transformam-nos em imagens padrão em preto e branco com um número pré-definido de *pixels*. Os *pixels* são então lidos da esquerda para a direita, coluna a coluna, correspondendo os *pixels* brancos a um som forte (com maior amplitude) e os *pixels* mais elevados na imagem padrão a um som alto (com maior frequência), ou seja, a codificação é brilho-amplitude e superioridade-frequência. ^(60–62)

Stiles e Shimojo mostram-nos que este algoritmo de codificação é o mais intuitivo dentro das diversas combinações possíveis com estes parâmetros. ⁽⁶²⁾ Estas evidências vão de encontro à tendência natural de começar da esquerda para a direita diversas tarefas visuais como ler. Por outro lado, objetos claros em fundos negros são mais atrativos visualmente e o nosso ouvido tem maior destreza em identificar a presença de som do que a sua ausência, o que se reflete na fórmula brilho-amplitude. Também a fórmula superioridade dos *pixels*-frequência parece ser ideal, como se prova pela maior rapidez em encontrar objetos com este algoritmo de codificação face a um algoritmo inverso, ou seja, um som baixo corresponder a uma localização superior. ^(55,63) Stiles e Shimojo foram mais longe na tentativa de perceber o quão intuitivo a utilização dos DSSs poderia ser, mostrando que indivíduos sem qualquer contato prévio com os dispositivos conseguiam associar determinado som à imagem que lhe correspondia numa percentagem de casos significativamente superior àquela esperada pelo acaso. ⁽⁶²⁾

A base neuronal

Esta interpretação intuitiva dos sons gerado, sem conhecimento do algoritmo presente, deve-se aos mapeamentos intermodais (*cross-modal mappings*), ou seja, a utilização dos mesmos circuitos neuronais por modalidades sensoriais diferentes, associando características entre uma e outra. Este conceito, já explorado décadas antes por autores como Melara e O'Brien, parece até ter maior relevo do que a já falada plasticidade intermodal (capacidade do sistema nervoso central mudar a sua organização funcional e estrutural) uma vez que indivíduos treinados na utilização dos dispositivos não foram significativamente melhores que aqueles que o utilizavam pela primeira vez. ⁽⁶⁴⁾

Contudo, a preponderância dos mapeamentos intermodais levanta-nos uma questão muito importante. Ora, se a existência de interações intermodais é crucial, poderão os invisuais congénitos ou que muito cedo perderam a visão fazer uso dos DSSs, uma vez que não podem aceder a estes recursos, visto nunca os terem formado? Uma vez mais, Stiles e Shimojo dão-nos a resposta a este problema, ao mostrar que este grupo de invisuais tem uma performance acima do acaso, pois, apesar da falta de mapeamentos intermodais entre a visão e a audição, estes indivíduos servem-se das experiências tácteis, utilizando cruzamentos entre o tato e a audição. ⁽⁶²⁾ Apesar de mais fraca, esta associação torna possível e eficaz a utilização de DSSs, que pode ser melhorada com programas de treino como veremos adiante.

Além disso Striem-Amit *et al.* mostram-nos que os DSSs visual-auditivos permitem a estes indivíduos ter acesso a informação “visual” com uma resolução superior a qualquer outro método de reabilitação até agora utilizado. ⁽⁵⁷⁾ Entre outras tarefas, os indivíduos utilizados nessa experiência foram capazes de imitar posturas corporais de indivíduos à sua frente e navegar em corredores com outras pessoas, sendo que um indivíduo conseguiu mesmo discernir expressões faciais. Adiante entrarei com maior detalhe no tipo de informação que os DSSs permitem ter acesso, aproveitando para explicitar o racional que permite a indivíduos sem experiência visual fazer uso desses dispositivos.

Atenção e treino

Outros pontos apontados como entraves à utilização quotidiana e prática de DSSs visual-auditivos são a necessidade de um elevado grau de atenção, impossibilitando assim o seu uso em cenários complexos com múltiplos estímulos, muito deles auditivos, assim como o elevado número de horas de treino necessário para uma eficaz utilização.

Este último argumento foi já, até certo ponto, debatido ao se demonstrar o elevado grau de intuição presente na utilização do dispositivo. Por outro lado, esta perspectiva deve-se em muito à utilização frequente de programas de treino pouco eficazes, demasiado artificiais e em ambientes controlados laboratoriais. Apesar de, à partida, a essa simplicidade de estímulos se poder associar uma maior facilidade de aprendizagem, tal não se verificou pois falta-lhes alguma proximidade relativamente aos mapeamentos neuronais intermodais. Uma linha preta num fundo branco é aparentemente mais facilmente identificada usando um DSS. Contudo, uma textura natural, apesar de mais complexa, permite uma aprendizagem mais intuitiva devido à sua riqueza em termos de estímulos sensoriais intermodais. ⁽⁶²⁾

Desta forma, é indubitável a importância de programas de treino para melhoria da *performance* dos utilizadores. Contudo, estes devem ser criados em ambientes naturais do dia-a-dia, com estímulos que apelem às conexões intermodais, em vez dos mais tradicionais e convencionais programas baseados em primitivos geométricos que necessitam de um esforço muito maior da parte dos participantes, alongando assim a aprendizagem a tempos não praticáveis. ^(3,62,65) Proulx *et al.* mostram uma melhor *performance*, tanto em termos de sucesso na identificação de objetos como no tempo utilizado na tarefa, por parte de indivíduos que usam o DSS continuamente no seu dia-a-dia, mesmo sem nenhum treino regular formal, face àqueles que o fazem exclusivamente em cenários laboratoriais. ⁽⁶⁵⁾

Relativamente à necessidade de elevados níveis de atenção, ao contrário do expectável, esse não parece ser o caso. Stiles e Shimojo mostraram não haver diferenças estatisticamente significativas entre indivíduos que realizaram tarefas de localização e identificação de objetos com distrações auditivas relativamente àqueles sem essas distrações. ⁽⁶²⁾ Como tal, a atenção não parece ter um papel preponderante na utilização de DSSs. Apesar de esse uso poder ser modulado por ela, esta dimensão

automática da utilização de DSSs assemelha-se muito às próprias experiências visuais. Finalmente, a utilização de dispositivos de transmissão que utilizam a condutância óssea permitem deixar livre o ouvido externo para captar todos os outros sons do meio rodeante. ^(3,57,59)

Estes dois conceitos – atenção e treino – estão intimamente ligadas na medida em que um treino eficaz e progressivo permite uma utilização cada vez mais automática, menos dependente e dispendiosa em termos de atenção. De facto, utilizadores ao relatarem a sua percepção acerca do uso de DSSs, descrevem a passagem de um racional dedutivo para uma apreensão imediata e intuitiva. ⁽⁵⁵⁾ Tal relaciona-se intimamente com as duas possibilidades de experiência subjetiva por parte dos utilizadores, nomeadamente, uma dedução das características do objeto através da desconstrução do som ou o reconhecimento duma assinatura auditiva característica do objeto. Este último conceito é interessante, especialmente se nos debruçarmos sobre o caso de um dos indivíduos que participou no estudo de Auvray *et al.*, músico, cuja performance foi a melhor entre todos os indivíduos, todos eles normovisuais de olhos tapados, conseguindo mesmo distinguir entre objetos semelhantes. Este indivíduo descrevia a referida assinatura auditiva para cada objecto, que mais não é do que uma experiência sinestésica, que tem por base os já referidos cruzamentos intermodais baseados na experiência visual e auditiva desse indivíduo. ^(55,61)

Informação obtida

Como foi já sendo referido ao longo da anterior discussão por variadas vezes, as duas informações mais básicas oferecidas pelos DSSs são a localização de um objeto e a sua forma, ou seja, a resposta às perguntas *onde?* e *o quê?* ^(55,57,62,65,66) Estas duas informações básicas estão intimamente relacionadas com dois percursos neuronais definidos denominados caminho cortical dorsal e ventral, respetivamente. ^(67,68)

Segundo os paradigmas tradicionais da investigação visual, seria impossível o desenvolvimento destes dois percursos neuronais caso determinado indivíduo não tivesse passado por aquilo que foi designado como “períodos críticos”. ⁽⁶⁹⁾ Estes

períodos seriam períodos temporais presentes na infância, durante o qual o sistema nervoso central tem ainda uma elevada plasticidade neuronal, permitindo o desenvolvimento e especialização das diferentes zonas cerebrais naquilo que seriam as suas funções. Contudo, recentemente demonstrou-se não só que o caminho cortical dorsal e ventral estão presentes nos cegos ⁽⁷⁰⁾, como também que estímulos não visuais estimulam esses caminhos ^(71,72) e, mais curioso, esses caminhos podem ser criados em invisuais sem qualquer tipo de experiência visual. ⁽⁷³⁻⁷⁵⁾ É precisamente esta a razão que permite a indivíduos sem experiência visual fazer uso dos DSSs, tema aprofundado já anteriormente. Mais interessante ainda é perceber que a privação da visão parece correlacionar-se com uma maior rapidez na aprendizagem da utilização de DSSs, bem como um maior potencial de progressão e *performance*. ⁽⁶⁵⁾

Os DSSs visual-auditivos vão mais longe do que a simples localização e forma, permitindo a interpretação de informações relativas à profundidade tanto em indivíduos considerados cegos, mas com ligeira percepção luminosa, como em indivíduos que se tornaram cegos já depois da nascença, mas numa fase precoce da infância. ^(61,76-78)

Existem também diversos casos relatados relativamente ao reconhecimento facial e de expressões, bem como da possibilidade de ler. ^(57,61,79)

Outro avanço mais recente passa pela elaboração de cor a partir da informação fornecida pelo DSS, possibilitando aos utilizadores simplesmente discriminar cores ou realizar tarefas mais complexas como emparelhar meias baseadas nas cores. ^(59,80) É neste contexto que surgiram novos DSSs como o *EyeMusic* e o *SeeColOr*, os quais utilizam o algoritmo usual dos DSSs, já explicado, utilizando, contudo, o som de diferentes tipos de instrumentos para codificar cada uma das cores. ^(59,80-82) Desta forma, além de aumentar a suavidade dos sons gerados, e como tal, a tolerância à sua escuta contínua, fornece-se uma informação adicional que poderá permitir aos utilizadores maior facilidade na realização de tarefas mais complexas. Contudo, este é um campo relativamente novo, sendo necessárias mais experiências, cada vez mais complexas e em cenários reais para poder retirar conclusões sólidas.

Em termos abstratos e perceptuais, os DSSs parecem também ter vantagens quando utilizados por invisuais pois melhoram a sua representação espacial, que está, à partida, diminuída nestes indivíduos, especialmente naqueles que não tiveram qualquer experiência visual. ⁽³¹⁾ Estes efeitos parecem prolongar-se até mesmo quando o aparelho não é utilizado, assemelhando-se a uma experiência sinestésica, como o

caso do músico acima referido, possibilitando a criação de ilusões visuais perante determinados estímulos fruto da criação de conexões intermodais auditivo-visuais. Renier *et al.* e Ward e Meijer relatam alguns desses casos. ^(61,83)

A possibilidade de ver

Chegados a este ponto, e depois de dissecada a complexa e integrante envolvimento dos DSSs, dispositivos que tornam acessível informação, de outra forma, inalcançável, pelo menos com esta precisão, a quem não pode fazer uso da visão, torna-se premente questionar – poderão afinal de contas os invisuais ver?

A resposta a esta questão não é fácil e poder-se-á situar no limiar de transição entre ciência e filosofia. Não é, no entanto, uma questão nova. Já em 1688, Molyneux colocou a seguinte questão a John Locke: “*Conseguiria uma pessoa, cega à nascença, distinguir visualmente um cubo de uma esfera se adquirisse subitamente a visão?*”.

⁽⁶⁰⁾ Ward e Meijer levam esta questão dum ponto de vista mais científico, questionando-se se em termos absolutos o cérebro transforma os estímulos auditivos em visão ou se os processa estritamente dentro da modalidade auditiva em que são recebidos. ⁽⁶¹⁾ Esta questão admite, desde logo, uma concepção da organização cerebral estanque e com dedicação sensorial, em vez duma organização funcional intermodal, guiada pela função e não pelo sentido, o que não parece corresponder à realidade. Além disso, como diz Morgan, a natureza estrutural do sistema perceptual não oferece nenhum critério que nos permita definir com exatidão o que é ver. ⁽⁸⁴⁾

Pacherie segue o mesmo caminho, afirmando que a percepção visual não tem de ter por base sensações visuais. ⁽⁸⁵⁾ E mesmo admitindo uma definição precisa do sentido da visão, com áreas cerebrais dedicadas com exclusividade, DeVolder *et al.* mostraram que invisuais, ao utilizarem DSSs, apresentam ativação das áreas de Brodmann 17, 18 e 19, áreas tradicionalmente associadas ao processamento de informação visual. ⁽³¹⁾ Striem-Amit *et al.* mostram também ativação da área VFWA (*visual word form area*) ao utilizar um DSS para ler. ⁽⁷⁹⁾ Estas evidências vão de encontro ao fato, já referido desde logo no início do trabalho, de que a maior parte dos invisuais apresentam danos no sistema visual periférico, mantendo funcionalidade do sistema visual central, e fazendo uso do mesmo.

Marr define visão como “*to know what is where by looking*” e, como já vimos, estas duas são as informações básicas oferecidas pelos DSSs. ⁽⁸⁶⁾ Também, Bach-y-Rita responde afirmativamente a esta questão ao definir ver como a capacidade de criar representações mentais relativas à forma, propriedades de superfície e localização de objetos, bem como interagir com eles de maneira comparável a uma pessoa normovisual. ⁽⁸⁷⁾ As próprias descrições por parte dos utilizadores são apresentadas como semelhantes a experiências visuais ou experiências de um novo sentido. ^(54,55)

Desta forma, a minha resposta a esta questão colocada é “É possível aos cegos ver”, não só por todos os argumentos filosóficos e conceptuais acima descritos, como pelo fato de Striem-Amit *et al.* terem já demonstrado que alguns invisuais utilizadores de DSSs ultrapassaram o limiar utilizado pela *World Health Organization* para a definição legal de cegueira, utilizando o teste de acuidade visual de Snellen. ⁽⁵⁷⁾

Conclusões

Neste trabalho foram abordadas duas áreas de reabilitação visual recorrendo ao sentido auditivo – a ecolocalização humana e a utilização de dispositivos de substituição sensorial. Em ambas, apesar da privação de informação visual *convencional*, é possível chegar ao objetivo final da representação espacial do meio envolvente, o que me leva a afirmar que estes dois métodos têm o potencial de reverter o estado de cegueira, permitindo realmente *ver*.

Apesar de algumas décadas de desenvolvimento, a utilização prática e quotidiana destes dois métodos é muito escassa, permanecendo sobretudo como ferramentas de investigação. ⁽³⁾ Como vimos, esta falta de aplicação clínica é erroneamente atribuída a elevados custos, utilização pouco intuitiva e até pouca eficiência. Todos estes argumentos foram contrapostos neste trabalho. É verdade que serão necessários mais trabalhos nestas áreas, sobretudo estudos que coloquem os utilizadores em ambientes reais e naturais, ricos em estímulos, como sucede no quotidiano, utilizando a ecolocalização humana em vez de sons artificiais gravados e posteriormente reproduzidos, ou no caso dos DSSs, que comparem o local de utilização da câmara, de modo a maximizar a eficiência do sistema. ^(50,55,59,61)

É também necessário compreender melhor a associação entre duração da cegueira com a acuidade visual na utilização destes métodos, realizando estudos que comparem invisuais recentes com invisuais congénitos em vez de comparar invisuais com normovisuais de olhos vendados, eliminado assim fatores de confundimento como a própria deficiência visual e permitindo uma análise mais objetiva da importância de experiências visuais passadas.

É evidente o percurso em falta mas, ainda assim, estes métodos encontram-se já aquém do potencial que apresentam e que demonstraram. Para que tal mude, e estes métodos ocupem realmente o local que devem como reais métodos de reabilitação, é necessário uma mudança de paradigma tanto a nível social como da comunidade científica.

A comunidade científica tem uma enorme responsabilidade não só no sentido de promover estas formas de reabilitação junto do público e comunidades, mas também de procurar continuamente a optimização e desenvolvimento dos mesmos. Urge o contínuo desenvolvimento de avanços tecnológicos que possibilitem colmatar

as falhas ainda existentes, bem como amadurecer os protótipos já existentes, com melhores algoritmos de transformação de informação, interfaces de emissão de som mais agradáveis, aparelhos mais pequenos e ergonômicos e preços acessíveis. ⁽³⁾ Este processo pressupõe também um avanço relativamente à compreensão dos processos neuronais que permitem a utilização tanto da ecolocalização humana como dos DSSs, nomeadamente a plasticidade neuronal e mapeamento intermodal que permitem uma especialização cortical e processamento multissensorial. ⁽⁵⁷⁾ Isto porque o desenvolvimento técnico permite uma melhor compreensão destes processos, mas o contrário também é verdade, formando-se uma simbiose perfeita. Um exemplo desta relação é as alterações plásticas necessárias a um cego para decodificar informação referente à cor, sem nunca ter tido qualquer experiência desta. ⁽⁵⁹⁾

Um outro caminho que poderá vir a ser percorrido, embora se afaste do âmbito deste trabalho, daí não ter sido abordado, é a possibilidade de ir além da restauração dos sentidos perdidos, expandindo-os para lá daquilo que é a normal utilização dos mesmos, levando a criação de supra-humanos. ⁽⁶⁰⁾

Este compromisso tecnologico-científico terá de ser combinado com programas de treino naturais e quotidianos integrados e articulados de forma próxima com as comunidades de invisuais, aliando assim o componente técnico ao fundamental componente social, pois muitas vezes este surge como importante fator limitante da implementação quotidiana dos avanços tecnologico-científicos. ⁽⁶²⁾ Por exemplo, o estigma social de quem produz continuamente sons bocais de modo a utilizar a ecolocalização é ainda enorme e uma das principais razões que impedem o seu sucesso. ⁽⁸⁸⁾

Existe, portanto, um longo caminho a ser percorrido ainda, mas acredito que, caso haja um esforço por parte da comunidade científica para se unir às comunidades existentes por todo o mundo, tanto a ecolocalização como os DSSs irão entrar na esfera da reabilitação visual efetiva, tornando-se uma das principais armas, complementando e expandindo as capacidades visuais oferecidas pelas atuais técnicas mais comumente utilizadas e melhorando a qualidade de vida de milhares de invisuais.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer à minha estimada família por me terem acompanhado no meu percurso vivencial e acadêmico que me trouxe até este momento. O meu profundo obrigado pelo seu apoio incondicional e tolerância em todos os momentos. Indissociável neste âmbito, quero agradecer à minha namorada Denisa por me guiar sempre pelo percurso certo, não me deixando cair na frustração e desalento quando a meta parecia ainda longe.

Agradeço ao Professor Doutor Óscar Dias e ao Doutor Marco Simão pelo tempo e saber disponibilizados, pelo apoio e condições oferecidas para que eu pudesse embarcar nesta aventura e pela forma crítica e formativa com que assumiram a orientação desta tese.

Finalmente, agradeço a todos os que, generosamente e de diferentes formas, estiveram presentes na minha vida durante este caminho e que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Bibliografia

1. WHO. Blindness and vision impairment [Internet]. Vol. 11, Fact sheets. 2018. p. e888–97. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
2. Humayun M, Dorn J, da Cruz L, Dagnelie G, Sahel J-A, Stanga PE, et al. Interim Results from the International Trial of Second Sight's Visual Prosthesis. *Ophthalmology*. 2012;119(4):779–88.
3. Maidenbaum S, Abboud S, Amedi A. Sensory substitution: Closing the gap between basic research and widespread practical visual rehabilitation. *Neurosci Biobehav Rev* [Internet]. 2014;41:3–15.
4. Jourdain M. Diderot's Early Philosophical Works. Chicago and London: The Open Court Publishing Company; 1916.
5. Supa M, Cotzin M, Dallenbach K. "Facial Vision": The Perception of Obstacles by the Blind. *Am J Psychol*. 1944;57(2):133–83.
6. Worchel P, Dallenbach KM. "Facial Vision": Perception of Obstacles by the Deaf-Blind. *Am J Psychol*. 1947;60(4):502–53.
7. Cotzin M, Dallenbach KM. "Facial Vision": The Role of Pitch and Loudness in the Perception of Obstacles by the Blind. *Am J Psychol*. 1950;63(4):485–515.
8. Griffin D. Echolocation by blind men, bats and radar. *Science* (80-). 1944;100:589–90.
9. Schenkman BN, Jansson G. The detection and localization of objects by the blind with the aid of long-cane tapping sounds. *Hum Factors*. 1986;28(5):607–18.
10. Rojas JAM, Hermosilla JA, Montero RS, Espí PLL. Physical analysis of several organic signals for human echolocation: Oral vacuum pulses. *Acta Acust united with Acust*. 2009;95(2):325–30.
11. Rojas JAM, Hermosilla JA, Montero RS, Espí PLL. Physical analysis of several organic signals for human echolocation: Hand and finger produced pulses. *Acta Acust united with Acust*. 2010;96(6):1069–77.
12. Thaler L, Arnott SR, Goodale MA. Neural correlates of natural human echolocation in early and late blind echolocation experts. *PLoS One*. 2011;6(5).
13. Thaler L, Reich GM, Zhang X, Wang D, Smith GE, Tao Z, et al. Mouth-clicks

- used by blind expert human echolocators - signal description and model based signal synthesis. *PLoS Comput Biol.* 2017;13(8):e1005670.
14. Rowan D, Papadopoulos T, Edwards D, Holmes H, Hollingdale A, Evans L, et al. Identification of the lateral position of a virtual object based on echoes by humans. *Hear Res.* 2013;300:56–65.
 15. Schenkman BN, Nilsson ME. Human echolocation: Blind and sighted persons' ability to detect sounds recorded in the presence of a reflecting object. *Perception.* 2010;39(4):483–501.
 16. Rowan D, Papadopoulos T, Archer L, Goodhew A, Cozens H, Lopez RG, et al. The detection of 'virtual' objects using echoes by humans: Spectral cues. *Hear Res.* 2017;350:205–16.
 17. Schenkman BN, Gidla VK. Human Echolocation in Static Situations: Auditory Models of Detection Thresholds for Distance, Pitch, Loudness and Timbre. 2018;1–53.
 18. Houtsma AJM. Pitch and timbre: Definition, meaning and use. *J New Music Res.* 1997;26(2):104–15.
 19. Arias C, Ramos OA. Psychoacoustic tests for the study of human echolocation ability. *Appl Acoust.* 1997;51(4):399–419.
 20. Schörnich S, Nagy A, Wiegrefe L. Discovering your inner bat: Echo-acoustic target ranging in humans. *JARO - J Assoc Res Otolaryngol.* 2012;13(5):673–82.
 21. Papadopoulos T, Edwards DS, Rowan D, Allen R. Identification of auditory cues utilized in human echolocation - Objective measurement results. *Biomed Signal Process Control.* 2011;6(3):280–90.
 22. Teng S, Whitney D. The acuity of echolocation: Spatial resolution in the sighted compared to expert performance Santani. *J Vis Impair Blind.* 2011;105(1):20–32.
 23. Rice CE, Feinstein SH. Sonar system of the blind: Size discrimination. *Science (80-).* 1965;148:1107–1108.
 24. Milne JL, Anello M, Goodale MA, Thaler L. A blind human expert echolocator shows size constancy for objects perceived by echoes. *Neurocase.* 2015;21(4):465–70.
 25. Teng S, Puri A, Whitney D. Ultrafine spatial acuity of blind expert human echolocators. *Exp Brain Res.* 2012;216(4):483–8.

26. Simmons JA. The resolution of target range by echolocating bats. *J Acoust Soc Am.* 1973;54(1):157–73.
27. Neuweiler G. Evolutionary aspects of bat echolocation. *J Comp Physiol.* 2003;189:245–56.
28. Denzinger A, Kalko EK JG. Ecological and evolutionary aspects of echolocation in bats. University of Chicago Press; 2004 p. 311–326.
29. DeLong CM, Au WWL, Stamper SA. Echo features used by human listeners to discriminate among objects that vary in material or wall thickness: Implications for echolocating dolphins. *J Acoust Soc Am.* 2007;121(1):605–17.
30. Hausfeld S, Power RP, Gorta A, Harris P. Echo perception of shape and texture by sighted subjects. *Percept Mot Skills.* 1982;55:623–32.
31. De Volder AG, Catalan-Ahumada M, Robert A, Bol A, Labar D, Coppens A, et al. Changes in occipital cortex activity in early blind humans using a sensory substitution device. *Brain Res.* 1999;826(1):128–34.
32. Collignon O, Voss P, Lassonde M, Lepore F. Cross-modal plasticity for the spatial processing of sounds in visually deprived subjects. *Exp Brain Res.* 2009;192(3):343–58.
33. Arnott SR, Thaler L, Milne JL, Kish D, Goodale MA. Shape-specific activation of occipital cortex in an early blind echolocation expert. *Neuropsychologia.* 2013;51(5):938–49.
34. Pascual-Leone A, Hamilton R. The metamodal organization of the brain. *Prog Brain Res.* 2001;134:427–45.
35. Burton H, Snyder AZ, Conturo TE, Akbudak E, Ollinger JM, Raichle ME. Adaptive Changes in Early and Late Blind: A fMRI Study of Braille Reading. *J Neurophysiol.* 2002;88:3359–71.
36. Noppeney U. The effects of visual deprivation on functional and structural organization of the human brain. *Neurosci Biobehav Rev.* 2007;31(8):1169–80.
37. Wallmeier L, Kish D, Wiegrebe L, Flanagan VL. Aural localization of silent objects by active human biosonar: Neural representations of virtual echo-acoustic space. *Eur J Neurosci.* 2015;41(5):533–45.
38. Arnott SR, Cant JS, Dutton GN, Goodale MA. Crinkling and crumpling: An auditory fMRI study of material properties. *Neuroimage.* 2008;43(2):368–78.
39. Cant JS, Goodale MA. Scratching Beneath the Surface: New Insights into the Functional Properties of the Lateral Occipital Area and Parahippocampal Place

- Area. *J Neurosci*. 2011;31(22):8248–58.
40. Jacobs RHAH, Baumgartner E, Gegenfurtner KR. The representation of material categories in the brain. *Front Psychol*. 2014;5:1–12.
 41. Pasqualotto A, Proulx MJ. The role of visual experience for the neural basis of spatial cognition. *Neurosci Biobehav Rev*. 2012;36(4):1179–87.
 42. Bavelier D, Neville HJ. Cross-modal plasticity: Where and how? *Nat Rev Neurosci*. 2002;3(6):443–52.
 43. Renier L, De Volder AG, Rauschecker JP. Cortical plasticity and preserved function in early blindness. *Neurosci Biobehav Rev*. 2014;41:53–63.
 44. Merabet LB, Pascual-Leone A. Neural reorganization following sensory loss: The opportunity of change. *Nat Rev Neurosci*. 2010;11(1):44–52.
 45. Röder B, Rösler F. Memory for environmental sounds in sighted, congenitally blind and late blind adults: Evidence for cross-modal compensation. *Int J Psychophysiol*. 2003;50(1–2):27–39.
 46. Dufour A, Després O, Candas V. Enhanced sensitivity to echo cues in blind subjects. *Exp Brain Res*. 2005;165(4):515–9.
 47. Muchnik C, Efrati M, Nemeth E, Malin M, Hildesheimer M. Central Auditory Skills In Blind And Sighted Subjects. *Scand Audiol*. 1991;20(1):19–23.
 48. Voss P, Lassonde M, Gougoux F, Fortin M, Guillemot J-P, Lepore F. Early- and Late-Onset Blind Individuals Show Supra-Normal Auditory Abilities in Far-Space. *Curr Biol*. 2004;14:1734–8.
 49. Voss P, Collignon O, Lassonde M, Lepore F. Adaptation to sensory loss. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci*. 2010;1(3):308–28.
 50. Kolarik AJ, Cirstea S, Pardhan S, Moore BCJ. A summary of research investigating echolocation abilities of blind and sighted humans. *Hear Res*. 2014;310:60–8.
 51. Kellogg WN. Sonar System of the Blind. *Science* (80-). 1962;137(3528):399–404.
 52. Carlson-Smith C, Weiner WR. The auditory skills necessary for echolocation: a new explanation. *J Vis Impair Blind*. 1996;90:21–35.
 53. Moore BCJ. *Cochlear Hearing Loss: Physiological, Psychological and Technical Issues*. Second. Chichester: Wiley; 2007.
 54. Auvray M, Myin E. Perception with compensatory devices: From sensory substitution to sensorimotor extension. *Cogn Sci*. 2009;33(6):1036–58.

55. Auvray M, Hanneton S, O'Regan JK. Learning to perceive with a visuo-auditory substitution system: Localisation and object recognition with "The vOICe." *Perception*. 2007;36(3):416–30.
56. Hirsh IJ. Auditory perception and speech. In: R C Atkinson, R J Hernstein, G Lindzey RDL, editor. *Handbook of Experimental Psychology*. New York: Wiley; 1988. p. 377–408.
57. Striem-Amit E, Guendelman M, Amedi A. "Visual" Acuity of the Congenitally Blind Using Visual-To-Auditory Sensory Substitution. *PLoS One*. 2012;7(3):1–6.
58. Brown D, Macpherson T, Ward J. Seeing with sound? exploring different characteristics of a visual-to-auditory sensory substitution device. *Perception*. 2011;40(9):1120–35.
59. Abboud S, Hanassy S, Levy-Tzedek S, Maidenbaum S, Amedi A. EyeMusic: Introducing a "visual" colorful experience for the blind using auditory sensory substitution. *Restor Neurol Neurosci*. 2014;32:247–57.
60. Bach-y-Rita P, W. Kercel S. Sensory substitution and the human-machine interface. *Trends Cogn Sci*. 2003;7(12):541–6.
61. Ward J, Meijer P. Visual experiences in the blind induced by an auditory sensory substitution device. *Conscious Cogn*. 2010;19(1):492–500.
62. Stiles NRB, Shimojo S. Auditory Sensory Substitution is Intuitive and Automatic with Texture Stimuli. *Sci Rep*. 2015;5:1–14.
63. Evans, K. K. Treisman A. Crossmodal binding of audio-visual correspondent features. *J Vis*. 2005;5(8):874.
64. Melara RD, O'Brien TP. Interaction Between Synesthetically Corresponding Dimensions. *J Exp Psychol Gen*. 1987;116(4):323–36.
65. Proulx MJ, Stoerig P, Ludowig E, Knoll I. Seeing "where" through the ears: Effects of learning-by-doing and long-term sensory deprivation on localization based on image-to-sound substitution. *PLoS One*. 2008;3(3).
66. Pollok B, Schnitzler I, Stoerig P, Mierdorf T, Schnitzler A. Image-to-sound conversion: Experience-induced plasticity in auditory cortex of blindfolded adults. *Exp Brain Res*. 2005;167(2):287–91.
67. Mishkin M, Ungerleider LG, Macko KA. Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends Neurosci*. 1983;6(C):414–7.
68. Marc J. The representing brain: Neural correlates of motor intention and

- imagery. *Behav Brain Sci.* 1994;17(1994):187–245.
69. Wiesel T, Hubel D. The Period of Susceptibility to the Physiological Effects of Unilateral Eye Closure in Kittens. *J Physiol.* 1970;89(1):419–36.
 70. Collignon O, Dormal G, Lepore F. Building the Brain in the Dark: Functional and Specific Crossmodal Reorganization in the Occipital Cortex of Blind Individuals. *Plast Sens Syst.* 2013;114–37.
 71. Prather SC, Votaw JR, Sathian K. Task-specific recruitment of dorsal and ventral visual areas during tactile perception. *Neuropsychologia.* 2004;42(8):1079–87.
 72. Sathian K, Lacey S, Stilla R, Gibson GO, Deshpande G, Hu X, et al. Dual pathways for haptic and visual perception of spatial and texture information. *Neuroimage.* 2011;57(2):462–75.
 73. Fiehler K, Burke M, Bien S, Röder B, Rösler F. The human dorsal action control system develops in the absence of vision. *Cereb Cortex.* 2009;19(1):1–12.
 74. Striem-Amit E, Dakwar O, Reich L, Amedi A. The large-scale organization of “visual” streams emerges without visual experience. *Cereb Cortex.* 2012;22(7):1698–709.
 75. Reich L, Szwed M, Cohen L, Amedi A. A ventral visual stream reading center independent of visual experience. *Curr Biol.* 2011;21(5):363–8.
 76. Renier L, De Volder AG. Vision substitution and depth perception: Early blind subjects experience visual perspective through their ears. *Disabil Rehabil Assist Technol.* 2010;5(3):175–83.
 77. Hughes B. Active artificial echolocation and the nonvisual perception of aperture passability. *Hum Mov Sci.* 2001;20(4–5):371–400.
 78. Renier LA, Anurova I, De Volder AG, Carlson S, VanMeter J, Rauschecker JP. Preserved functional specialization for spatial processing in the middle occipital gyrus of the early blind. *Neuron.* 2010;68(1):138–48.
 79. Striem-Amit E, Cohen L, Dehaene S, Amedi A. Reading with Sounds: Sensory Substitution Selectively Activates the Visual Word Form Area in the Blind. *Neuron.* 2012;76(3):640–52.
 80. Bologna G, Deville B, Pun T. Blind navigation along a sinuous path by means of the see color interface. *Lect Notes Comput Sci (including Subser Lect Notes Artif Intell Lect Notes Bioinformatics).* 2009;5602 LNCS(PART 2):235–43.

81. Levy-Tzedek S, Hanassy S, Abboud S, Maidenbaum S, Amedi A. Fast, accurate reaching movements with a visual-to-auditory sensory substitution device. *Restor Neurol Neurosci*. 2012;30(4):313–23.
82. Levy-Tzedek S, Novick I, Arbel R, Abboud S, Maidenbaum S, Vaadia E, et al. Cross-sensory transfer of sensory-motor information: Visuomotor learning affects performance on an audiomotor task, using sensory-substitution. *Sci Rep*. 2012;2:2–6.
83. Renier L, Laloyaux C, Collignon O, Tranduy D, Vanlierde A, Bruyer R, et al. The Ponzo illusion with auditory substitution of vision in sighted and early-blind subjects. *Perception*. 2005;34(7):857–67.
84. Morgan M. Molyneux's Question. Cambridge University Press; 1977.
85. Pacherie E. Du problème de Molyneux au problème de Bach-y-Rita. In: Proust J, editor. *Perception et Intermodalité, Approches actuelles du Problème de Molyneux*. 9th ed. Paris: Presses Universitaires de France; 1997. p. 255–93.
86. Marr D. *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. W. H. Freeman and Company; 1982.
87. Bach-y-Rita P. *Brain Mechanisms in Sensory Substitution*. New York: Academic Press; 1972.
88. Thaler L. Echolocation may have real-life advantages for blind people: An analysis of survey data. *Front Physiol*. 2013;4 MAY(May):1–9.